

# 岩盤構造物の性能評価における課題について

亀村 勝美\*

財団法人 深田地質研究所 (〒113-0021 東京都文京区本駒込 2-13-12)

E-mail: kame@fgi.or.jp

これまで地下のエネルギー貯蔵用岩盤地下空洞などにおいては、岩盤構造物の長期耐久性やメンテナンスフリーなどを基に長期間の供用期間を通してのトータルコストに優位性ありとして建設してきた。しかしながら合理的な構造物の建設と維持管理が求められる今、岩盤構造物においても、当初設定された機能や性能を維持するためには、それらの時間的変化を念頭に置いた検討とその結果に基づく事前の対応が必要である。ここでは、ライフサイクルコストの概念に基づいて岩盤構造物の性能やコストの評価方法の現状を概括し、課題について述べる。

**Key Words :** *underground structure, performance evaluation, life cycle cost*

## 1. はじめに

一般的に、地上に造られた構造物と地下に造られた構造物を比較すると、同じ機能、性能を持つ空間であれば岩盤内に作るよりも地表に作る方がコストを要しないとされ、地下空間の利用は限られた条件あるいは特殊な用途の構造物に限定されている。

鉄道や道路における山岳トンネル工法トンネルは、その計画線形上避け得ないものとして、また、揚水式地下発電所のための大規模地下空洞はその機能から当然地下に作られてきた。一方、エネルギー貯蔵のための岩盤タンクなどの利用推進に当たっては、長期耐久性やメンテナンスフリーなどを基に長期間にわたる供用期間を通してのトータルコストを以って経済的なメリット有りとし、計画し建設してきた。

こうした考えの基となっている地下構造物が永久構造物であるかのような概念は、あくまで概念であり具体的に評価されたものではなかった。しかし、1999年の新幹線トンネル覆工コンクリート片の落下事故を契機に、これまで設定した供用期間中に大規模な補修、補強を必要としない、あたかも永久構造物であるかのように思われ続けてきたトンネルなどの岩盤構造物も、

- 構造物の性能は時間の経過とともに低下する。
- 構造物の設計において考慮する荷重は不確実性を持つものであり、長い供用期間中には設計時の予測を越える荷重が作用し、構造物の損傷や崩壊を招くこともあり得る。

という、当たり前のことを再認識させられたのである。すなわちコンクリートや岩盤で構成される岩盤構造物においても、当初設定された機能、性能を維持するためにはそれらを念頭に置いた事前の検討と、設計から施工、維持管理に至る各段階での適切な対応が必要であることが明らかとなってきた。

では地下空間利用のメリットはないのか？

本論文の目的は、岩盤構造物に関する安全性やコストの評価に関する現状の問題点を概括し、それらに対する新たな取組みを模索することにある。

## 2. 土木構造物のアセットマネジメント

1956年の経済白書に「戦後は終わった」と述べられてから以降のいわゆる高度成長期に数多く建設された社会基盤構造物が、50年近くを経てその機能に様々な支障を来し始め、トンネルや橋梁などの土木構造物の機能維持にかかるコストは、時間の経過と共に上昇の一途を辿り始めた。

一方、社会は、その成熟化と共に経済的には長い低成長時代に入った。即ち、社会資本の増大は緩やかになってきたものの、その中に占める老朽化構造物の割合は、今後時間の経過と共に飛躍的に増加する。方や高齢化・少子化などから社会基盤構造物の機能の維持と安全の確保は、なんとしてでも成し遂げねばならない。とは言え、税収の増加は見込めないため、公共投資といえども、いや公共投資であるからこそ、何のために、どのように限

られた予算を使うのかについての説明責任（アカウントビリティ）は果たさねばならない。

このようなことから構造物の建設費と供用期間中の維持管理に関する費用の総計（ライフサイクルコスト＝LCC）を、安全と機能維持の条件の下に最適化すること、すなわち科学的手法によるマネジメントの導入が求められている。

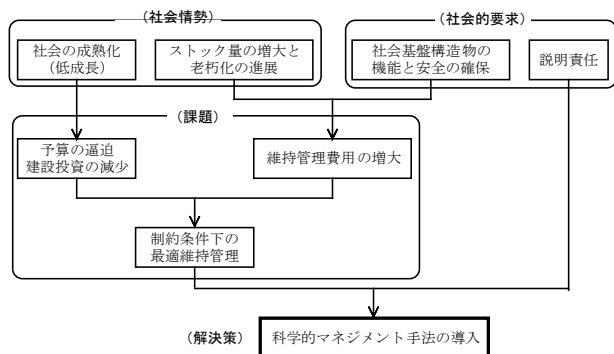


図-1 維持管理に求められるもの

国土交通省は、2003年「道路を資産として捉え、構造物全体の状態を定量的に把握・評価し、中長期的な予測を行うとともに、予算的制約の下で、いつどのような対策をどこに行うのが最適であるかを決定できる総合的なマネジメントの構築が必要」としてアセットマネジメントの重要性を説き、2004年度以降各地方整備局において具体的な対応を開始している。また各地方自治体においても計画的な維持管理への取り組みを開始したが、その多くはアセットマネジメント導入の前提条件となる構造物や施設の点検に本格的に着手した段階でしかない。しかもこれまできちんとした点検への取り組みを怠ってきた事が災いし、点検作業には膨大な時間と労力を必要とするため、本格的なアセットマネジメントへの道りは遠いのが現状である。

さて、アセットマネジメントのためには、対象とする資産（構造物）の現在の価値、それを得るために支出した費用、そしてこれから維持管理していくための費用のすべて、すなわちライフサイクルコストを知る必要がある。土木構造物のライフサイクルコスト（以下LCCと記す）とは、計画・設計－建設－維持管理－解体撤去の各過程に要する費用の総額であり、これを数式で表すと、次式のようになる。

$$LCC = C_i + C_d + C_m + C_f \quad (1)$$

ここに、 $C_i$ ：初期建設費用、 $C_d$ ：運用費用  
 $C_m$ ：維持管理費用、 $C_f$ ：解体撤去費用

式(1)は、計画・設計から解体撤去に至るまでの全コストの合計を示しているが、維持管理費用のみを取出し

てLCCとして比較検討している例も多い。

しかし供用年数として50年や100年を考える土木構造物では、このような運用や維持管理のコストだけではなく、材料の劣化に起因する構造物の損傷が引き起こす事故や地震、台風、集中豪雨などの災害によるコストが無視し得なくなる。こうした事故や災害の発生確率は非常に小さいが、一旦生じると莫大な損失を生じるものであり、工学的に定義されるリスクとして評価することができる。こうしたリスクが万が一発生すると、場合によってはその構造物の運用主体の存続をも脅かす可能性がある。

さらに、最近の社会情勢や経済情勢においては、社会構造や経済構造の急激な変革により、構造物に対するニーズや価値観が変化し、従来の価値観では価値ありと評価されるものも、ある時に無用の長物となるリスクも十分考えられる。すなわちコストだけではなく、社会的便益や社会的信用など様々な観点からのリスク評価によってLCC算定結果の解釈にも大きな違いが出てくることにも十分留意する必要がある。

### 3. リスクとリスクマネジメント

我々が普段使っているリスクという言葉には2つの側面がある。一つは「何かを失う」という側面である。例えば劣化が進行し構造物が壊れたという状況に対してリスクが意識される。

もう一つは、そうした事象が「不確実である」という側面である。まだ大きな変状は生じていないが、ひょっとしたら壊れるかもしれないときにリスクが意識される。リスクを考慮して何か判断を下す場合には、リスクの持つこの二つの側面を評価する必要がある。そこでここではJIS Q 2001での定義に基づき、損失の発生確率（probability）と損失（consequence）の積（これを損失期待値という）をリスクと定義する。式で示すと次のようになる。

$$R = P \text{ (発生確率)} \times C \text{ (損失)} \quad (2)$$

例えば山岳工法トンネルの施工では、切羽の進行と共に新たな不良地山が出現したり、それまでに予測しなかった大量湧水が発生する可能性がある。この場合、これらの事象が発生する可能性（確率）と具体的な事象が発生した場合の損失（地山補強対策費用、高透水帯対策費用、工期遅延による費用増、第三者被害が発生した場合の損害、安全性に対する社会的信頼の損失など）の積がリスクとして評価される。

したがって岩盤構造物の建設から供用、供用後の廃棄

までのトータルコスト (LCC) は、初期建設費用、運用費用、維持管理費用などと予期しない損失の和として次式のように定義することができる。

$$LCC = C_i + C_d + C_m + C_f + \sum_n P_j \times C_j^R \quad (3)$$

ここに;  $P_j$ ; j 番目のリスク事象の発生確率

$C_j^R$ ; j 番目のリスク事象発生時の損失

$n$ ; リスク事象の数

である。

このリスクには、構造物の経時変化に伴う材料劣化や荷重条件の変化により生じる可能性のある構造物の機能損傷を原因とする事故や、非常に稀ではあるが確率的には必ず発生することが予想される巨大災害 (地震, 台風, 豪雨など) による被害が含まれる。

一般に構造物の施工や維持管理にお金を掛ければ掛けるほど、何らかの損失が生じる可能性 (リスク) は小さくなる。したがって複数の施工, 維持管理計画案毎にコストとリスクを算定すると, 例えば図-2 のような関係が得られる。

図において, 維持管理計画第 1 案は最小限の建設投資と維持管理しか行わず, その代わりに大きなリスクを覚悟しようとするものである。これに対し第 5 案は, 莫大な (過剰な) 初期投資と維持管理費を投入し, リスクをできる限り排除しようとするものである。コスト最小化の意味では, このどちらの案も好ましいものではなく, 第 3 案が最も合理的な維持管理計画として選定されることになる。また, 回避すべきリスクレベルが設定できる場合には, そのリスクレベル以下の案が選定されることになる。

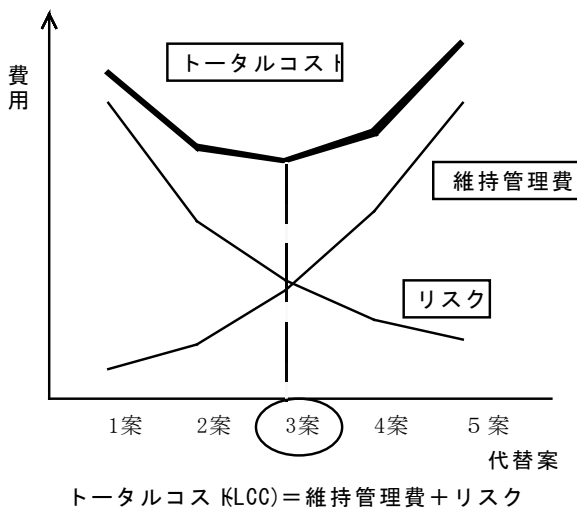


図-2 LCC を用いた代替案の評価の概念

リスクは, それを算定しただけでは意味がない。求め

られたものを基に様々な対策を講じる, すなわちマネジメントすることに意義がある。

リスクマネジメントとは, 重大な災害や事故に関わる現状のリスクを知り, 分析し, それを効率的に低減する方策 (回避, 転嫁という方策もある) を選定し, 実行することである。マネジメントにおいて重要なことは, リスクへの対策案に要する費用とその効果の評価であり, 費用というマイナス要因と効果というプラス要因の比較検討の中から意思決定がなされる。すなわちリスクを考慮したマネジメントとは, 利益と不利益というトレードオフの関係にある二つの要素に対して意思決定者の基準 (効率, 安全性など) に基づき妥協点を見出すことである。

そして公共性が高く, 長い供用期間と安全性を求められる土木構造物では, このように定義される LCC を評価することによってはじめて合理的, 経済的な建設計画 (調査, 設計, 施工) と維持管理計画 (運用, 保守) を立てることができるのである。

では岩盤構造物についてもこのような LCC の評価は可能なのであろうか?

この LCC 算定のためには, 性能の評価が重要となる。しかし岩盤構造物では, その評価が非常に難しいのである。

#### 4. 岩盤構造物の LCC 評価における課題

##### (1) 岩盤構造物の維持管理の難しさ

LCC 評価に基づくアセットマネジメント手法を岩盤構造物へ適用するにあたって大きな問題がある。図-3 は, 地上構造物の代表としての橋梁と岩盤構造物の代表としての山岳工法トンネルとの維持管理における状況を比較したものである。

橋梁などの構造物は, 設計時の荷重条件 (交通量, 風, 地震など) や使用する構造材料 (鋼, コンクリートなど) が明確であり, 構造解析により具体的な安全率を設定された上で設計される。また供用中の状態や荷重の変化 (実際にどんな車両がどれだけ走っているのか, 過積載の車両はないのかなど) や構造材の劣化などは目視によっても, また計測によってもはっきりと捉えることができる。

したがって設計図書が保存され, 定期的な点検が行われていれば, 現状の健全度を評価することが可能であり, その橋梁をどのような状態で維持したいのか (要求性能) が明確であれば, その評価結果に基づいて適切な対策を講ずることができる。ちなみに近年, 橋梁の崩落や破損などの事例が報じられているが, これらは適切な点検が実施されていなかったり, 点検で問題ありとされていても予算がなかったりなどの理由で適切な対策が採ら

れていなかったことが原因と考えられる。

橋梁に対しトンネルに代表される岩盤構造物では、設計に用いられる荷重はトンネルが施工される岩盤の力学特性や水理特性に依存するものであり、設定は難しい。加えて、その岩盤の特性は非線形性、不均質性を示し、問題をより困難にしている。また、トンネルの構造部材に当たるものはコンクリートなどの覆工だけでなく、岩盤そのものも含まれる。すなわち、設計にあたって設定する荷重も、それを受ける構造物もその力学特性の評価は、橋梁などに比較すると格段に難しい。

## (2) 性能評価における課題

図-4 は様々な構造物の維持補修の概念を示したものである。建設時点で所用の性能を有していた構造物は、時間の経過とともにその性能を低下させる。この性能の低下状況を示すのが劣化曲線である。劣化曲線は構造物を構成する部材の性能や、使用条件に支配され、耐久性に富んだ部材を用いた場合には劣化速度は遅くなり、使用条件が厳しい場合には劣化速度は速くなる。

一方、構造物には計画時点で設定された要求性能あるいは使用限界があり（これが必ずしも明確にされてい

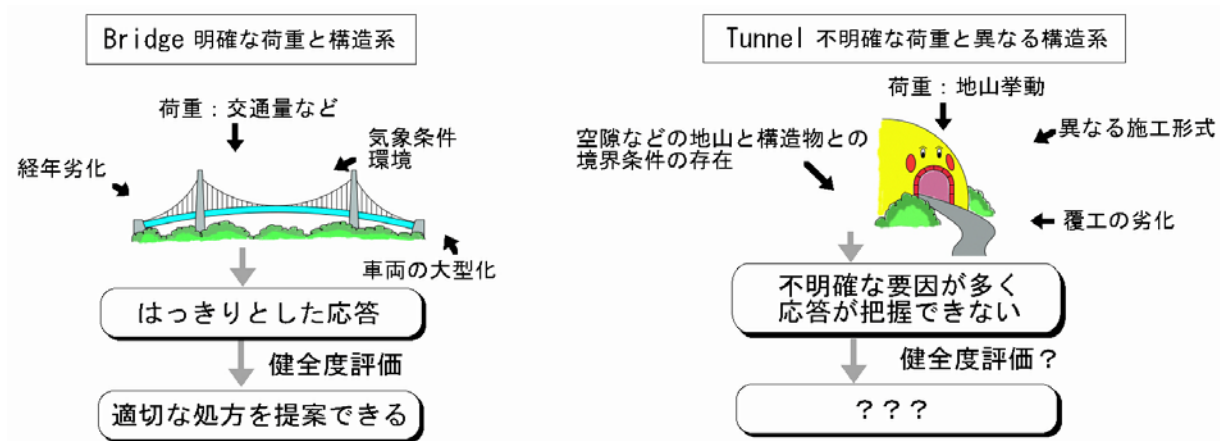


図-3 どうしてトンネルの維持管理は難しいのか？

更にトンネルでは、掘削により構造物を造るわけであるが、この掘削方法には様々なものがあり、その方法によってトンネル周辺の地盤に与える影響が異なってくる。従ってトンネルが現在どのような状態にあるのか？その健全度はどの程度なのかを知ることは非常に困難な作業となる。

岩盤構造物の維持管理における問題点についてももう少し詳細に見てみよう。

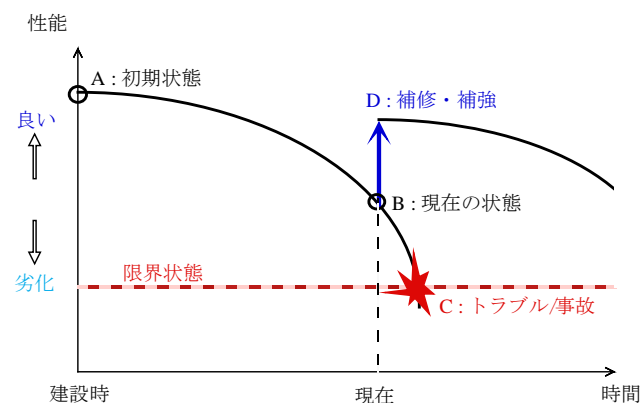


図-4 構造物の性能変化と維持管理

い場合がある）、何ら維持管理を行わない場合、劣化曲線はいつしかこの限界状態に至り、様々な問題をもたらすことになる。そしてこの限界状態に到るまでの時間が、構造物の機能に基づいた本来の耐用年数といえる。

このような劣化曲線が設定できたとして実際に構造物が、現在どのような状態にあるのかを把握するのが点検作業である。そして点検の結果、現状が明らかになり限界状態に到る可能性が高いと判断された場合には、補強、補修あるいは再生が行われ、新たな寿命が与えられることになる。このような性能の経時変化が明らかになって初めてLCCが具体的に評価される。

しかし岩盤構造物については、以下のような問題点があり、具体的なLCC評価を困難なものにしている。

### a) 建設時の品質の把握（図-4 A点）

多くの岩盤構造物では、建設終了時点での性能が明確になっていない。

力学的な観点からの性能は、安全率などにより表される場合が多い。安全率は、構造物に作用する荷重と構造物に与えた耐力の比によって定義されるが、岩盤構造物の場合、この荷重と耐力が必ずしも明確になっていないため、性能が曖昧なものになっている。

設計においては、構造物周辺の地盤・岩盤の力学特性を調査試験結果や過去の類似データに基づいて設定し、

荷重を算定する。算定する方法については様々なものが提案されているが、橋梁の設計における荷重（構造部材自重、車両・人荷重、風・地震荷重など）と比較するとそれ程明確なものではなく、多分に経験則的な部分を含んだものとなっている。

また有限要素法などの数値解析手法では、地盤・岩盤の自重から岩盤構造物が掘削される地山の初期応力を計算し、これより掘削解放力を算定して支保工と岩盤に作用させる荷重とする方法もある。この場合も実際に支保工に作用する応力は、支保工と周辺地山の力学的相互作用によって決まるものであり、地山の力学特性に含まれる不確実性、支保工の地山との接触状態が影響することになる。

一方、最新の岩盤構造物の考え方では構造物周辺の地山も力学的安定性を検討すべき構造物の一部として評価している。しかし地山の応力状態は、覆工や躯体との相互作用によって変化し、その応力状態によって地山の力学特性も変化する。これらが実際にどのような状態になっているのか把握することは非常に難しい。そもそも岩盤の初期応力を詳細に評価することが非常に難しい。結果として、地山を含めた岩盤構造物が完成時にどのような状態にあり、その安全率はいくつなのかは解っていないのが現状といえる。

更に、設計結果に基づいて建設が行われるが、地中構造物における主たる構造部材であるコンクリートの材料強度などは設計通りでなく、ばらつきを考慮して安全側に設定されることが多く、実際の構造物の材料の変形特性や強度特性はどうなっているのか詳細は不明な場合が多く、結果として建設完了時の構造物の安全率も明確ではない。である。また建設時や建設完了後に、設計において設定した荷重は実際に作用しているのか？また施工時の誤差等により不具合は生じていないか？など、性能劣化を考える前の初期条件を明確にすることは難しい。

定期的な点検などにより劣化に関するデータを取得することは重要であるが、同時に建設完了時の初期状態の評価手法について検討する必要がある。

#### b) 劣化特性の評価（図-4 B点）

各機関において既に整備され、あるいは現在整備されつつある点検マニュアルなどに従って点検作業を実施すれば、構造物に生じているクラックや中性化の状況などが明らかになる。しかしある時点のデータだけでは劣化特性を評価することはできない。すなわち定められた点検調査間隔とその方法により、対象とするデータを計画的に収集蓄積する必要がある。そしてその経時変化を追跡するとともに、不具合の進行している部位を把握することで、その系全体の耐久性あるいは健全性に及ぼす影響の評価が可能となり、具体的な劣化曲線を設定することができる。

劣化曲線は、補修補強による性能回復の程度を明確にして、対策の費用対効果を算定する基礎となるものである。しかし岩盤構造物の場合、岩盤という特異な環境下に置かれるため、橋梁などとは異なり外観の目視ができないなど点検作業そのものが難しい面もあり、材料特性の変化や構造物の変状などの十分なデータが蓄積されていないという問題がある。

また、劣化特性は図-4 に示したように一本の曲線や直線で表されることは少ない。すなわち、同時期に同じように施工された構造物（構造部材）であっても、あるものは早く劣化し、あるものはいつまでも健全性を保つというように、性能は時間とともにばらつきを生じていく。このようなばらつきをどのように評価するのも重要な問題である。

#### c) 要求性能の明示（図-4 C点）

性能の劣化曲線を設定するに当たっても、また具体的にリスクを評価した上で最適な維持補修策を検討するに当たっても、まずその構造物に要求される性能、あるいは機能を明確にしておく必要がある。そしてその性能がどのような状態になったときにリスク事象が生じるのかを評価しなければならない。

単一の機能を要求される道具や機械などの性能は簡単に提示することができるが、多くの機能が複合している岩盤構造物の性能を示すことは難しい。土木構造物の性能設計へ向けた検討の中で性能に関する多くの議論が成されているが、一般論はともかく性能明示のための手法はまだ確立されていない。

岩盤構造物についても性能に関する集中的な議論を行い、評価手法とそのためのデータの取得方法を明らかにする必要がある。

#### d) 補修、補強工の効果の定量的評価（図-4 D点）

多くの点検、調査データから劣化のメカニズムが明らかになれば、的確な補修、補強が可能になる。その際には、用いられる工法の性能維持あるいは回復に対する効果が定量的に評価されている必要がある。

また、その効果を確認するためにモニタリング手法が開発される必要がある。しかし既に述べたように岩盤空間の閉鎖性、遮蔽性などの特性がモニタリングの障害となっており、新たな技術の開発が求められる。

### (3) 課題への対応

3.2 に示した項目の内、1)、3)、4) は、図4 のグラフの縦軸である性能を具体的にどのような指標でどのように評価するのかという問題である。また、2) の劣化特性評価の問題は、性能の時間依存性の問題であり、実は岩盤構造物では一番難しい問題である。

岩盤構造物の性能評価に係わる工学的性質は、一般の建設工事などの短期間の挙動評価では、要求される精度

もそれほど高いものではなく、既存の試験法などで設定される変形特性、強度特性などで評価することができる。しかし、トンネルや地下空洞などの岩盤構造物の長期の供用期間中の性能評価や高レベル放射性廃棄物処分技術に特有の超長期間にわたる安定性、安全性評価の問題では、現行の工学的性質の評価だけでは必ずしも十分ではない。

例えば、仮に岩盤の破壊特性がC、 $\phi$ で評価できるとして、これらの物性値の時間依存性については、クリープ試験などにより現象面からの評価が試みられているだけであり、本質的な知見がほとんどない状況である。

一方で、岩盤中に存在する大小様々な不連続面が掘削による応力状態の変化、水理条件の変化などを誘因として、時間の経過とともに劣化し、岩盤としての特性が変化し、構造物の性能に影響を与えている。

このようなことから、岩盤構造物の時間依存性を含めた性能評価の問題を解決するためには性能に関する実データを出来るだけ多く収集し、それらを総合的に分析する必要がある。既に多くの機関によって点検が行われ、多くのデータが実在している。しかしその多くは性能として、例えば健全性というような定性的かつその評価が観察者の主観に大きく依存するような指標を用いている。

実際、数ある点検データには、前の点検までは問題ないとされていた箇所が、次の点検では急に要補修となったり、反対に要注意とされていたものが健全と評価されたりした例が見受けられる。勿論こうしたことは健全性の評価方法をより厳密にし、主観的なものから客観的なものへ、また定性的なものから定量的なものへとしてい

く事である程度改善することが可能と考えられる。しかしその一方で、そうすることによる点検作業の煩雑化、作業時間増、コスト増は不可避であり、この点でも要求する精度とそれを達成するためのコストのバランスをどこで取るかの議論が必要となろう。

## 5. おわりに

ライフサイクルコストの観点から岩盤構造物の性能評価における問題について述べてきた。解決すべき課題は多い。しかし、今最も大事なことは、まず現状に関する共通認識を関係者が持つことであろう。そのためには、現在各機関が実施し、保有している劣化に関するデータの整理と再評価が不可欠である。

現在の山岳工法トンネルの標準工法は、指針化された計測管理手法によって得られた膨大なデータによってその妥当性が検証され認められるようになった。劣化に関する議論にも、それに匹敵する量のデータが必要とされるであろう。ともすれば好ましくないデータということで公表を控えようとすることも考えられる。しかしコンプライアンスと情報公開が求められるこれからの社会では、たとえネガティブな情報であろうとも積極的に公表し、一般の人々にもステークホルダーの一人としてのリスク認識を持ってもらうことも重要であると考えられる。

## SOME CONSIDERATIONS ON THE PERFORMANCE EVALUATION OF UNDERGROUND STRUCTURES

Katsumi KAMEMURA

In general, the construction cost of underground structures is more expensive than that constructed on the ground if they have same functions. In spite of this fact, the underground structures have been constructed, because of advantages in total cost of long term maintenance and operation. However, today, rational design, construction and maintenance are common requirements for all structures.

In this paper, based on the concept of life cycle cost, the present situation in the evaluation of performance and cost of underground structures is summarized and problems are discussed..